Journal of Architectural and Environmental Research, Volume 4, Issue 6, September 2026, pp.184-204.

Journal of Architectural and Environmental Research

DOI: 10.30470/jaer.2026.2105046.1248

Architecture of Automotive Industrial Complexes in the Transition to Industry 5.0: Development of Indicators and a Case Study of the Iran Khodro Industrial Group

Farjad Bazghandi [1*], Majid Salehi Nia [2], Abbas Jahanbakhsh [3], Hossein Samavatyan [4]

1. Ph.D. Student of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran, Farjadbazghandi1373@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, ma.salehinia@hsu.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran, a.jahanbakhsh@aui.ac.ir
4. Associate Professor, Department of Psychology, Faculty of Humanities, University of Isfahan, Isfahan, Iran, h.samavatyan@edu.ui.ac.ir

Research Article

***Corresponding Author:**
Farjad Bazghandi
Farjadbazghandi1373@gmail.com

Received: 2026/07/05
Accepted: 2026/09/21

Keywords:
Industry 5.0, industrial architecture, automotive complex architecture, Iran Khodro, Human-Centricity.

Abstract

Purpose: The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0, with an emphasis on human-centricity, sustainability, and resilience, introduces new requirements for the spatial organization and architecture of industrial complexes. This study aims to develop architectural features for Iranian automotive production complexes aligned with Industry 5.0 and assess the extent to which a case study in Iran conforms to these features.

Method: This mixed-methods study was conducted in three stages. First, architectural features of Industry 5.0 identified and conceptualized in a previous study were used as the initial framework. Second, complementary and context-specific architectural features were identified through field visits to several automotive production complexes and interviews with managers of different automotive complexes. Qualitative data were analyzed through open and axial coding, and the initial framework was refined. Third, the final framework was operationalized in a questionnaire administered to 307 employees of the Iran Khodro Industrial Group to assess the conformity of the complex with the identified Industry 5.0 architectural features.

Findings: The findings resulted in a framework of architectural features addressing human-centricity, sustainability, resilience, flexibility, and spatial adaptability to emerging technologies. The assessment of Iran Khodro identified the extent to which these features have been realized and highlighted areas requiring further improvement.

Conclusion: Industry 5.0 architecture in automotive complexes requires a transition from purely production-oriented spaces toward environments that are human-centered, flexible, sustainable, and resilient. The proposed framework can provide a basis for evaluating and redesigning automotive production complexes and guiding future architectural interventions in the transition toward Industry 5.0.

Cite this article: Bazghandi, F., Salehi Nia, M., Jahanbakhsh, A., & Samavatyan, H. (2026). Architecture of Automotive Industrial Complexes in the Transition to Industry 5.0: Development of Indicators and a Case Study of the Iran Khodro Industrial Group. *Journal of Architectural and Environmental Research*, *4*(6), 184–204. https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2105046.1248

Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

Authors

نشریه پژوهش‌های معماری و محیط، دوره ۴ ، شماره ۶، شهریور ۱۴۰۵ ، صفحات ۱۸۴ -۲۰۴.

دوفصلنامه پژوهش های معماری و محیط

DOI: 10.30470/jaer.2026.2105046.1248

معماری مجموعه‌های صنعتی خودرویی در گذار به موج پنجم صنعت: توسعه شاخص‌ها و مطالعه موردی گروه صنعتی ایران‌خودرو

فرجاد بازقندی[۱] *، مجید صالحی نیا[۲]، عباس جهانبخش[۳]، حسین سماواتیان[۴]

۱. دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، Farjadbazghandi1373@gmail.com

۲. دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران، ma.salehinia@hsu.ac.ir

۳. استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، a.jahanbakhsh@aui.ac.ir

۴. دانشیار گروه روانشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، h.samavatyan@edu.ui.ac.ir

مقاله پژوهشی

*** نویسنده مسئول:**

فرجاد بازقندی

Farjadbazghandi1373@gmail.com

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴

انتشارمقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

واژگان کلیدی:

موج پنجم صنعت، معماری صنعتی، معماری مجموعه‌های خودرویی، ایران‌خودرو، انسان محوری.

چکیده:

هدف: گذار از صنعت نسل چهارم به موج پنجم صنعت، با تأکید بر انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری، الزامات جدیدی را برای سازماندهی فضایی و معماری مجموعه‌های صنعتی ایجاد کرده است. پژوهش حاضر با هدف توسعه ویژگی‌های معماری مجموعه‌های تولیدی خودرویی ایران متناسب با موج پنجم صنعت و سنجش میزان انطباق یک نمونه موردی در داخل ایران با این ویژگی‌ها انجام شده است.

روش: این پژوهش با رویکرد آمیخته و در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست، ویژگی‌های معماری موج پنجم صنعت که در پژوهش پیشین شناسایی و تبیین شده بودند، به‌عنوان چارچوب اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله دوم، با بازدید میدانی از چند مجموعه تولیدی خودرو و انجام مصاحبه با مدیران مجموعه‌های خودرویی مختلف، ویژگی‌های تکمیلی و زمینه‌مند معماری شناسایی شد. داده‌های کیفی با کدگذاری باز و محوری تحلیل و چارچوب اولیه تکمیل شد. در مرحله سوم، چارچوب نهایی در قالب پرسشنامه در اختیار ۳۰۷ نفر از بهره‌برداران گروه صنعتی ایران‌خودرو قرار گرفت و میزان انطباق این مجموعه با ویژگی‌های معماری موج پنجم سنجیده شد.

یافته‌ها: یافته‌ها به توسعه چارچوبی از ویژگی‌های معماری متناسب با الزامات انسان‌محوری، پایداری، تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری و سازگاری فضایی با فناوری‌های نوظهور انجامید. ارزیابی ایران‌خودرو نیز میزان تحقق این ویژگی‌ها و ابعاد نیازمند ارتقا را مشخص کرد.

نتیجه‌گیری: معماری موج پنجم در مجموعه‌های خودرویی مستلزم گذار از فضای صرفاً تولیدمحور به محیطی انسان‌محور، منعطف، پایدار و تاب‌آور است. چارچوب ارائه‌شده می‌تواند مبنایی برای ارزیابی و بازطراحی معماری مجموعه‌های تولیدی خودرویی در مسیر گذار به موج پنجم صنعت باشد.

استناد به این مقاله: بازقندی، فرجاد، صالحی نیا، مجید، جهانبخش، عباس و سماواتیان، حسین. (۱۴۰۵) معماری مجموعه‌های صنعتی خودرویی در گذار به موج پنجم صنعت: توسعه شاخص‌ها و مطالعه موردی گروه صنعتی ایران‌خودرو. *نشریه پژوهش‌های معماری و محیط*، ۴(۶) ۱۸۴ -۲۰۴.

https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2105046.1248

شاپا چاپی: ۲۵۸۸-۶۴۶۳

الکترونیکی: ۲۴۷۸-۲۹۸۱

پدیدآورندگان

مقدمه

پس از دو دوران صنعتی اخیر، دوران خودکارسازی (صنعت ۳.۰) و دوران دیجیتال (صنعت ۴.۰) که در آن دستگاه‌های هوشمند و متصل، فرآیندهای تولید و جریان کار را خودکار کردند، دوران آتی، یعنی (صنعت ۵.۰) بر همکاری هوشمند میان انسان و ماشین تمرکز دارد، جایی که فناوری نه به‌عنوان جایگزین، بلکه به‌عنوان تقویت‌کننده توانایی‌های کالبدی، شناختی و خلاقیت انسانی عمل می‌کند (Longo et al., 2020, P.4). دگرگونی های صنعتی نیم‌قرن اخیر، ساختار تولید، فناوری و فضاهای کاری را به‌طور بنیادین دگرگون ساخته است. در موج سوم صنعت، تمرکز اصلی بر اتوماسیون و دیجیتال‌سازی فرآیندها بود که کارایی فنی را افزایش و خطای انسانی را کاهش داد (تافلر، ۱۳۷۳، ص.۴۶۶). ورود به موج چهارم صنعت با به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند مانند اینترنت اشیا، تحلیل کلان‌داده و هوش مصنوعی، یکپارچه‌سازی زنجیره‌های تولید و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌ها را ممکن ساخت و بهره‌وری را افزایش داد (کیانی بختیاری و موسوی موحدی، ۱۴۰۰، ص.۱۶۱). با این حال، غلبه دیدگاه فناوری‌محور موجب شد نقش انسان در ساختار ، محدود به کاربر یا ناظر فناوری شود (Nahavandi, 2019, P.2).

پیدایش موج پنجم صنعت، تغییر پارادایمی بنیادینی را نشان می‌دهد که محوریت را از فناوری به سمت انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری سوق داده است. در این موج، فناوری در خدمت توانمندسازی شناختی و خلاقیت انسانی است و فضاهای تولیدی و کاری باید بازطراحی شوند (European Commission, 2021, P.12)، تا تعامل پویا میان انسان، ماشین و محیط را آسان کنند (Zhou et al., 2025, P.8). این تغییر پارادایم، پیامدهای گسترده‌ای برای معماری مجموعه‌های صنعتی دارد؛ معماری صنعتی دیگر تنها نقش کالبدی یا عملکردی ندارد، بلکه به‌عنوان ابزار راهبردی برای افزایش بهره‌وری، نوآوری و کیفیت تجربه انسانی در محیط کار عمل می‌کند (گودینی، ۱۳۹۵، ص.۱۳). در این چهارچوب، طراحی فضاهای صنعتی باید فراتر از کارایی عملکردی باشد و به رفاه کارکنان، انگیزش، حس تعلق، خلاقیت و انعطاف‌پذیری فضایی توجه کند (Bocken & Short, 2021, P.2). از دیدگاه نظری، گذار از موج‌های سوم و چهارم به پنجم را می‌توان حرکتی از فناوری‌محوری به انسان‌محوری دانست که نیازمند بازتعریف اصول طراحی فضاهای تولیدی است (Breque, 2021, P.3). در این دیدگاه، بهره‌وری دیگر محدود به شتاب تولید یا کاهش هزینه‌ها نیست، بلکه ایجاد تعادل میان کارایی فنی، رضایت انسانی و پایداری محیطی نیز مدنظر است (Lachvajderova,2023, P.4).

با وجود گسترش ادبیات نظری صنعت ۵.۰، همچنان شکافی میان اصول و الزامات این رویکرد و ترجمه آن‌ها به ویژگی‌های عینی و قابل ارزیابی در معماری مجموعه‌های صنعتی وجود دارد (گودینی و همکاران، ۱۳۹۵، صص۸–۱۰). این مسئله در مجموعه‌های تولیدی خودرویی، به‌دلیل مقیاس و پیچیدگی فضایی، وابستگی به فناوری‌های نوظهور و ضرورت هم‌زمان پاسخ‌گویی به نیازهای انسانی، زیست‌محیطی و تولیدی، اهمیت بیشتری می‌یابد. ازاین‌رو، بازتعریف ویژگی‌های معماری این مجموعه‌ها متناسب با الزامات انسان‌محوری، پایداری، تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری و سازگاری با فناوری‌های نوین، به‌عنوان یکی از الزامات گذار به صنعت ۵.۰ مطرح است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تبیین ویژگی‌های معماری متناسب با موج پنجم صنعت در مجموعه‌های تولیدی خودرویی و ارزیابی میزان انطباق یک نمونه موردی با این ویژگی‌ها انجام شده است. این پژوهش می‌کوشد با پیوند میان مبانی نظری صنعت ۵.۰ و الزامات فضایی و معماری مجموعه‌های تولیدی، چارچوبی برای ارزیابی وضعیت موجود و جهت‌دهی به بازطراحی و توسعه این مجموعه‌ها در مسیر تحقق محیط‌های صنعتی انسان‌محور، پایدار و تاب‌آور ارائه کند.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با رویکرد آمیخته و با هدف شناسایی، تکمیل و ارزیابی ویژگی‌های معماری مجموعه‌های صنعتی خودرویی در گذار به موج پنجم صنعت انجام شد. منطق کلی پژوهش بر این اساس استوار بود که ابتدا چارچوب مفهومی اولیه بر مبنای یافته‌های پژوهش پیشین شکل گیرد، سپس با استفاده از مطالعات میدانی و داده‌های کیفی، ابعاد و ویژگی‌های زمینه‌مند معماری مجموعه‌های صنعتی خودرویی شناسایی و به چارچوب اولیه افزوده شود و در نهایت، چارچوب حاصل به‌صورت کمی مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس، پژوهش در سه مرحله به شرح زیر انجام شد.

۱. تدوین چارچوب اولیه پژوهش

در مرحله نخست، ویژگی‌های معماری متناسب با الزامات موج پنجم صنعت که در پژوهش پیشین پژوهشگران شناسایی و تبیین شده بود (بازقندی و همکاران، ۱۴۰۵، ص.۵۴-۵۷). به‌عنوان نقطه شروع پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت. این ویژگی‌ها حاصل مطالعه مبانی نظری و ادبیات موضوع و همچنین اجماع خبرگان در پژوهش پیشین بود و مجموعه‌ای از مؤلفه‌های معماری مرتبط با انسان‌محوری، همکاری انسان و فناوری، انعطاف‌پذیری، هوشمندسازی، پایداری، تاب‌آوری و الزامات فضایی محیط‌های صنعتی را دربرمی‌گرفت. در این مرحله، ویژگی‌های معماری مذکور به‌عنوان چارچوب اولیه سنجش معماری موج پنجم در مجموعه‌های صنعتی خودرویی سازمان‌دهی شدند. با توجه به تفاوت ماهیت، مقیاس و فرایندهای تولید در صنایع مختلف، چارچوب اولیه به‌عنوان چارچوبی باز و قابل تکمیل در نظر گرفته شد و صرفاً مبنایی برای هدایت مطالعات میدانی قرار گرفت.

۲. مطالعات میدانی و تکمیل چارچوب معماری

در مرحله دوم، به‌منظور شناسایی ابعاد و ویژگی‌هایی که ممکن است به دلیل تفاوت‌های زمینه‌ای صنعت خودرو در چارچوب اولیه منعکس نشده باشند، مطالعات میدانی در چند مجموعه تولیدی خودرو انجام شد. این مرحله با استفاده از بازدید و مشاهده میدانی فضاهای تولیدی و انجام مصاحبه با مدیران و افراد دارای تجربه و شناخت از مجموعه‌های صنعتی خودرویی صورت گرفت. هدف از این مرحله، صرفاً ارزیابی ویژگی‌های معماری از پیش تعیین‌شده نبود، بلکه تلاش شد تجربه‌ها، مسائل، الزامات و راهکارهای موجود در محیط‌های واقعی تولید شناسایی شود؛ ازاین‌رو، داده‌ها به‌صورت اکتشافی تحلیل شدند. اطلاعات حاصل از بازدیدهای میدانی و مصاحبه‌ها با استفاده از کدگذاری باز و کدگذاری محوری تحلیل شد. در کدگذاری باز، داده‌های متنی حاصل از مصاحبه‌ها و مشاهدات به واحدهای مفهومی اولیه تجزیه و مفاهیم مرتبط با ویژگی‌های معماری، سازمان فضایی، محیط کار، فناوری، تعامل انسان و ماشین و الزامات عملکردی استخراج شد. سپس در مرحله کدگذاری محوری، مفاهیم اولیه بر اساس ارتباط مفهومی و محتوایی در قالب مقوله‌های مرتبط سازمان‌دهی شدند و روابط میان مفاهیم و مقوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، ویژگی‌هایی که در چارچوب اولیه وجود نداشتند اما از داده‌های میدانی و تجربه متخصصان صنعت خودرو استخراج شده بودند، به چارچوب اولیه افزوده شدند. بدین‌ترتیب، چارچوب حاصل از این مرحله، علاوه بر اتکا به مبانی نظری و پژوهش پیشین، از شواهد میدانی و الزامات زمینه‌ای صنعت خودرو نیز برخوردار شد.

۳. ارزیابی کمی چارچوب نهایی

در مرحله سوم، چارچوب تکمیل‌شده در قالب پرسشنامه به بخش کمی پژوهش وارد شد. جامعه مورد مطالعه را بهره‌برداران و کارکنان مجموعه صنعتی مورد مطالعه، یعنی گروه صنعتی ایران‌خودرو، تشکیل دادند. پرسشنامه در اختیار کارکنان مرتبط با فرایندهای تولید قرار گرفت و در مجموع ۳۰۷ پرسشنامه قابل استفاده گردآوری شد. پاسخ‌دهندگان از گروه‌های مختلف شغلی شامل اپراتورها، تکنسین‌ها و مهندسان بودند تا ارزیابی ویژگی‌های معماری از دیدگاه گروه‌های مختلف بهره‌بردار محیط صنعتی انجام گیرد. در این مرحله، هر یک از ویژگی‌های استخراج‌شده در چارچوب نهایی در قالب گویه‌های پرسشنامه عملیاتی شد و میزان انطباق وضعیت موجود مجموعه صنعتی ایران‌خودرو با الزامات و ویژگی‌های معماری موج پنجم صنعت مورد سنجش قرار گرفت. داده‌های حاصل از پرسشنامه با استفاده از روش‌های آماری مناسب تحلیل شدند و نتایج به‌منظور تعیین میزان تحقق ویژگی‌های معماری موج پنجم صنعت در مجموعه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند.

در مجموع، فرایند پژوهش از چارچوب نظری اولیه، به کشف و استخراج ویژگی‌های زمینه‌مند از میدان و سپس به ارزیابی کمی چارچوب نهایی حرکت کرده است. بنابراین، بخش کیفی پژوهش نقش اکتشافی و تکمیلی داشته و بخش کمی امکان سنجش میزان انطباق چارچوب حاصل با وضعیت واقعی مجموعه صنعتی مورد مطالعه را فراهم کرده است. این توالی روش‌شناختی موجب شده است که شاخص‌های نهایی صرفاً بر مبنای ادبیات نظری شکل نگیرند، بلکه ضمن برخورداری از پشتوانه نظری، با شرایط و الزامات واقعی معماری و تولید در صنعت خودروی ایران نیز انطباق یابند.

پیشینه پژوهش

تحولات صنعت در طول دو سده اخیر، همواره با تغییر در شیوه‌های تولید، فناوری، سازمان کار و به تبع آن، ساختار و سازمان فضایی محیط‌های صنعتی همراه بوده است (یوسف زاده و قدسی‌فر، ۱۳۹۶، ص. ۵۹). در این میان، معماری صنعتی به‌عنوان بستر کالبدی فعالیت‌های تولیدی، متناسب با هر مرحله از تحول صنعتی، رویکردها و الزامات فضایی متفاوتی را تجربه کرده است (بیات، ۱۳۸۴). بر این اساس، بررسی روند تحول صنعت و معماری صنعتی از انقلاب‌های صنعتی تا شکل‌گیری مفهوم صنعت ۵.۰، زمینه‌ای برای تبیین الزامات و شاخص‌های معماری مجموعه‌های صنعتی معاصر فراهم می‌کند.

۱. صنعت

به گروهی از شرکت‌ها یا سازمان‌های تولیدی که کالاها یا منابع درآمدی را تولید یا عرضه می‌کنند صنعت می‌گویند (Encyclopaedia Britannica). صنعت هم خانواده تصنع، صناعت و مصنوع بوده و درفرهنگ لغت فارسی بر هنر، پیشه و ساخت دلالت دارد (فرهنگ لغت دهخدا، ۱۳۷۷). این واژه به عملکرد هر یک از مراکز یا رشته‌های تولیدی اعم از کارخانه‌ها و کارگاه‌ها نیز اطلاق شده است (فرهنگ لغت عمید، ۱۳۷۷). با توجه به مطالب یاد شده، صنعت مجموعه‌ای است از فعالیت‌ها که با استفاده از منابع موجود کالا یا خدمات تولید می‌کند (نیکزادفر، ۱۴۰۳، ص.۳۵).

۲. معماری صنعتی

معماری صنعتی به طراحی و ساخت فضاهای فیزیکی، ساختمان‌ها و محیط‌های لازم برای فعالیت‌های صنعتی اطلاق می‌شود (گودینی و همکاران، ۱۴۰۰، ص.۷۸). این حوزه فراتر از جنبه‌های صرفاً سازه‌ای و زیبایی‌شناختی، بر کارایی، ایمنی، ارگونومی، مدیریت جریان مواد و انرژی، و انطباق با فرآیندهای تولیدی تمرکز دارد (Odeleye, 1967, P.12). معماری صنعتی در طول زمان، با توجه به تحولات فناوری و نیازهای محیطی، دستخوش تغییرات بسیاری شده است؛ از ساختمان های صنعتی اولیه در قرون وسطی که از کلیسا الهام گرفته تا کارخانه‌های عظیم و متمرکز قرن نوزدهم و فضاهای تولیدی منعطف و هوشمند امروزی (Holness & Giddings, 1996, P.81). این معماری باید بتواند تعادلی میان نیازهای عملیاتی، اقتصادی و انسانی ایجاد کند. در نهایت معماری صنعتی در نظر دارد فضایی مناسب برای فعالیت‌های صنعتی فراهم کند (طباطبائیان، ۱۳۸۸، ص.۲۲).

۳. انقلاب صنعتی و موج پنجم صنعت

در فرهنگ لغت آکسفورد، صنعت فعالیت اقتصادی مرتبط با فرآوری مواد اولیه و تولید کالا در کارخانه‌هاست (Demir & Cicibaş, 2019, P.2). اصطلاح انقلاب صنعتی توسط مورخ اقتصادی قرن نوزدهم، آرنولد توینبی در توصیف توسعه اقتصادی بریتانیا از سال ۱۷۶۰ تا ۱۸۴۰ میلادی استفاده شد (Mattila et al.,2022, P.174). از زمان انقلاب صنعتی اول، صنعت موتور رفاه اروپا بوده و توسعه صنعتی تأثیر گسترده‌ای بر جامعه داشته است (European Commission, 2021, P.3). صنعت موج ۱.۰ با مکانیزاسیون و موتور بخار تولید انبوه و شهرنشینی صنعتی را ممکن کرد (Rijwani et al., 2024, P.1). صنعت موج ۲.۰ با برق و خط مونتاژ، تولید پیشرفته و فناوری‌های نوآورانه مانند موتور احتراق داخلی و پلاستیک‌ها را تسهیل کرد (شواب، ۱۳۹۹، ص.۶۳). صنعت موج ۳.۰ با ورود سامانه های الکترونیک ، قدرت محاسباتی را وارد تولید کرد و اینترنت و کلان داده را معرفی نمود تا بهره‌وری و پیش‌بینی نیازهای نگهداری بهبود یابد (Demir & Cicibaş, 2019, P.3).

اصطلاح صنعت موج ۴.۰ اولین بار در نوامبر ۲۰۱۱ میلادی توسط کلاوس شواب[1] مطرح شد و سطوح فیزیکی، دیجیتال و بیولوژیکی را به همگرایی رساند (کیانی بختیاری و موسوی موحدی، ۱۴۰۰، ص.۱۵۶). این انقلاب سامانه های فیزیکی سایبری (CPS) را به تولید فیزیکی سایبری (CPPS) ارتقا داد و کارخانه هوشمند را به‌عنوان یکی از ابتکارات کلیدی معرفی کرد (Xu et al., 2021, P.530). فناوری‌های کلیدی شامل اینترنت اشیا، رباتیک، هوش مصنوعی، کلان داده، محاسبات ابری و واقعیت افزوده هستند که بهره‌وری و انعطاف‌پذیری تولید را افزایش

می‌دهند (Demir et al., 2019, P.689). صنعت موج ۵.۰ یا «دوران افزایش»، مرحله‌ای است که انسان و ماشین در همزیستی کامل فعالیت می‌کنند (Longo et al., 2020, P.2). این موج با هدف جبران اثرات انسانی انقلاب صنعتی چهارم، نگرانی‌های اجتماعی و زیست‌محیطی را در نوآوری‌های فناوری مدنظر قرار می‌دهد (Lachvajderova et al., 2023, P.126). برخلاف صنعت موج ۴.۰ که بیشتر بر دیجیتالیزاسیون و هوش مصنوعی تمرکز داشت، صنعت موج ۵.۰ انسان‌محور است و رفاه کارگران و پایداری محیط زیست را در مرکز فرآیند تولید قرار می‌دهد (European Commission, 2021, P.3).

٤. تفاوت صنعت موج ٤.٠ و صنعت موج ٥.٠

صنعت موج ۴.۰ عمدتاً بر دیجیتالی‌سازی و هوش مصنوعی برای افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری تولید تمرکز داشت و کمتر به عدالت اجتماعی و پایداری توجه می‌کند (European Commission, 2021, PP.8–9). در مقابل، صنعت موج ۵.۰ بر همزیستی انسان و ماشین، خدمت به انسان و محیط زیست تأکید دارد (Nahavandi, 2019, P.3). این رویکرد، «کارخانه هوشمند اجتماعی» را ایجاد می‌کند که در آن اجزای انسانی و سیستم‌های سایبر–فیزیکی از طریق شبکه‌های سازمانی با هم تعامل دارند (Souza et al., 2022, P.151). صنعت موج ۵.۰ بهره‌وری اقتصادی، توسعه پایدار و توانمندسازی نیروی انسانی را همزمان دنبال می‌کند و مسئولیت شرکت‌ها را به کل زنجیره ارزش گسترش می‌دهد (Ghobakhloo et al., 2022, P.717). صنعت موج ۵.۰ دگرگونی در فناوری سبز و دیجیتال است که هدف آن دستیابی به صنعتی پایدار و انسان‌محور می‌باشد. این مفهوم به‌عنوان نسخه‌ای سبزتر و انسانی‌تر از صنعت موج ۴.۰ معرفی شده و بر همکاری میان انسان‌ها و ربات‌ها در فرآیند تولید تأکید دارد (Gugercin. S., & Gugercin, U., 2021, P.526). این همکاری با قرار دادن عامل انسانی در کانون سامانه های یکپارچه صنعت موج ۴.۰

جدول ۱. ویژگی‌های های اختصاصی موج پنجم صنعت. تدوین: نویسندگان.

ویژگی موج پنجم صنعت	ابعاد ویژگی	سرچشمه	ویژگی موج پنجم صنعت	ابعاد ویژگی	سرچشمه
پایداری اجتماعی	تأمین فضاهای رفاهی و اجتماعی؛ ایجاد فضاهای تعامل کارکنان؛ عدالت در دسترسی به خدمات؛ ارتقای رفاه و رضایت شغلی	Oyekunle et al., 2024, P.120	ارزش‌های انسانی در مرکز	اولویت دادن به رفاه، سلامت، رضایت شغلی، رشد فردی و توانمندسازی نیروی انسانی در فرآیندهای صنعتی	Longo et al., 2020, P.2
سازگاری با محیط زیست	بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر؛ کاهش مصرف انرژی؛ استفاده از مصالح پایدار و بازیافت‌پذیر	Kovári, 2024, P.271	همکاری انسان و ربات	طراحی فضاهای مشترک انسان–ربات؛ تفکیک و ایمنی مسیرهای حرکت؛ انعطاف‌پذیری خطوط تولید؛ پیش‌بینی زیرساخت تجهیزات رباتیک	Tomidei et al., 2024, P.67; Campagna & Rehm, 2023, P.7
حفظ حریم خصوصی و استقلال فردی	اطمینان از اینکه جمع‌آوری داده‌ها و نظارت بر عملکرد کارکنان به گونه‌ای است که حریم خصوصی آن‌ها را نقض نکند و استقلال فردی آن‌ها حفظ شود	European Commission, 2021, PP.6-8	در نظر گرفتن اولویت‌های اجتماعی	دسترسی عادلانه به امکانات؛ فضاهای جمعی؛ امکانات رفاهی و خدماتی نزدیک به محل کار؛ توجه به نیازهای گروه‌های مختلف کارکنان	Barata & Kayser, 2023, P.783
محصولات پاسخگو به نیازهای ابرازی	طراحی محصولاتی که فراتر از رفع نیازهای کاربردی، به انسان اجازه می‌دهند تا هویت، علایق و سبک زندگی خود را ابراز کند	Ostergaard, 2018	شخصی‌سازی و سفارشی‌سازی	توانایی تولید انبوه محصولات و خدمات متناسب با نیازها و ترجیحات فردی هر مشتری	Ostergaard, 2018
جامعه فوق‌هوشمند	زیرساخت دیجیتال؛ پایش هوشمند محیط و تولید؛ نمایشگرهای دیجیتال	Metcalf, 2024, P.2	بازگشت تماس انسانی به تولید	این ویژگی بر اثر هنری که انسان ساز است و تقویت خلاقیت و مهارت‌های انسانی تمرکز دارد	Ostergaard, 2018
شکل‌گیری انسان مولد، خلاق و چندمهارته	این ویژگی بر همکاری انسان–ماشین، تقویت خلاقیت و مهارت‌های انسانی، و ایجاد محیط کاری توانمندساز تأکید دارد	Gugercin. S., & Gugercin, U., 2021, P.526	کنترل انسانی	امکان مداخله و کنترل انسان بر فرایندهای هوشمند؛ ایستگاه‌های کنترل انسانی	Tóth et al., 2023, P.3

تحقق می‌یابد و نشان‌دهنده دوره‌ای است که تعامل میان انسان، ربات و الگوریتم‌های هوشمند محور اصلی آن است (Chen. et al., 2026, P. 5). در جدول ۱ میتوان برخی از ویژگی‌های اختصاصی نسل پنجم صنعت را مشاهده کرد.

همان‌گونه که طی سده گذشته وضعیت دشوار کارگران اروپایی که در فیلم «عصر مدرن» چاپلین نمادین شده بود، به‌طور چشمگیری بهبود یافت، اکنون نیز باید گذارهای جدید صنعتی به‌گونه‌ای هدایت شود که نگرانی از چیرگی ماشین‌ها بر نیروی کار کاهش یابد (Xiao, 2025, P.12). موج پنجم صنعت بر سه محور اصلی استوار است: انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری. برای تبدیل صنعت به بستری واقعی برای رفاه، اهداف آن باید با ملاحظات اجتماعی و زیست‌محیطی تنظیم شود. این رویکرد شامل نوآوری مسئولانه‌ای است که نه صرفاً برای افزایش بهره‌وری یا سود، بلکه برای افزایش رفاه همه ذی‌نفعان از سرمایه‌گذاران و کارگران تا مصرف‌کنندگان، جامعه و محیط زیست دنبال می‌شود (European Commission, 2021, P.14).

یافته‌های پژوهش

۱. گردآوری داده‌ها

داده‌های اولیه پژوهش حاضر بر مبنای دستاوردهای پژوهش پیشین پژوهشگران در زمینه شناسایی ویژگی‌های معماری مجموعه‌های صنعتی سنگین در بستر موج پنجم صنعت شکل گرفت. در پژوهش پیشین، مجموعه‌ای از ویژگی‌های معماری متناسب با الزامات موج پنجم صنعت شناسایی و با استفاده از روش دلفی و اخذ اجماع از خبرگان اعتبارسنجی و تأیید شد. همچنین، در همان پژوهش، ویژگی‌های شناسایی‌شده بر اساس ماهیت و حوزه اثرگذاری آن‌ها در سه محور اصلی شامل الگوهای مالکیت و بهره‌برداری از فضای تولید، مسائل فنی، تکنیکی و انرژی، و برنامه‌ریزی فضایی و سازماندهی عملکردها دسته‌بندی شدند. این چارچوب که حاصل پژوهش پیشین و اجماع خبرگان بود، در پژوهش حاضر به‌عنوان چارچوب اولیه برای بررسی و ارزیابی معماری مجموعه‌های صنعتی خودرویی مورد استفاده قرار گرفت. ساختار سه‌محوری و ویژگی‌های معماری مرتبط با هر محور در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. چارچوب اولیه ویژگی‌های معماری مجموعه‌های صنعتی سنگین. تدوین: نویسندگان.

یافته‌های پژوهش در دو بخش اصلی ارائه می‌شوند. در بخش نخست، با هدف تکمیل چارچوب نظری اولیه، مطالعات میدانی و تحلیل داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها و مشاهدات انجام گرفت. در بخش دوم، چارچوب تکمیل‌شده در جامعه مورد مطالعه مورد ارزیابی کمی قرار گرفت تا میزان انطباق مجموعه صنعتی خودرویی با ویژگی‌های معماری متناسب با موج پنجم صنعت سنجیده شود.

۱.٤. مطالعات میدانی و تحلیل کیفی داده‌ها

پس از تدوین چارچوب نظری اولیه، مرحله مطالعات میدانی با هدف شناسایی ویژگی‌های معماری زمینه‌مند و تکمیل چارچوب اولیه انجام شد. در این مرحله، از چند مجموعه تولیدی در صنعت خودرو بازدید میدانی به عمل آمد و با ۱۱ نفر از مدیران صنایع خودروسازی مصاحبه انجام

گرفت (آقای مهندس حسینی (مدیر ارتباطات ایرانخودرو)– آقای مهندس سالاری (رئیس بخش فنی مهندسی ایرانخودرو)– آقای مهندس استادی (مدیر سالن بدنه سازی ایرانخودرو)–آقای مهندس نقاش زاده (مدیر کیفیت ایرانخودرو) — آقای مهندس سرداری (مدیر سالن رنگ ایرانخودرو)– آقای مهندس ملک (منابع انسانی ایرانخودرو)– آقای مهندس غفوریان (آموزش ایرانخودرو)– آقای مهندس عرب بیگی(گروه خودروسازی ارس)– آقای مهندس بابایی (پارس خودرو)– آقای مهندس سادات (گروه خودرو سازی سایپا)– آقای مهندس رکن آبادی (کرمان موتور). همچنین، به‌منظور دستیابی به دیدگاه کاربران و بهره‌برداران فضاهای تولیدی، با بیش از ۲۱ نفر از کارکنان این مجموعه‌های خودرویی نیز مصاحبه صورت گرفت. انتخاب دو گروه مدیران و کارکنان با هدف دستیابی هم‌زمان به دیدگاه مدیریتی و تجربه مستقیم بهره‌برداران از محیط‌های تولیدی صورت گرفت.

در مصاحبه با مدیران، ویژگی‌های معماری موجود در چارچوب اولیه پژوهش در اختیار آنان قرار گرفت و به‌عنوان مبنای گفت‌وگو معرفی شد. از مدیران خواسته شد ضمن بررسی این ویژگی‌ها، بر اساس تجربه و شناخت خود از مجموعه‌های صنعتی خودرویی، ویژگی‌های معماری مهم و اثرگذاری را که در چارچوب اولیه پیش‌بینی نشده است شناسایی و بیان کنند. بنابراین، هدف مصاحبه با مدیران صرفاً تأیید یا رد ویژگی‌های موجود نبود، بلکه شناسایی ابعاد و ویژگی‌های مغفول‌مانده از چارچوب اولیه و استخراج الزامات خاص معماری مجموعه‌های خودرویی بود.

در مصاحبه با کارکنان و بهره‌برداران نیز تمرکز بر تجربه مستقیم آنان از محیط کار و تأثیر ویژگی‌های فضایی و معماری بر عملکرد روزمره قرار داشت. از آنان در قالب مجموعه‌ای از پرسش‌های نیمه‌ساختاریافته خواسته شد مهم‌ترین ویژگی‌های محیط کار خود را که بر نحوه انجام وظایف، راحتی، کیفیت و کارایی فعالیت آنان تأثیرگذار است بیان کنند و همچنین مشخص کنند تغییر یا بهبود کدام ویژگی‌های محیط کار می‌تواند به بهبود عملکرد و کارکرد آنان منجر شود. این پرسش‌ها امکان شناسایی ویژگی‌هایی را فراهم کرد که ممکن است از دیدگاه مدیریتی کمتر مورد توجه قرار گرفته باشند، اما از منظر کاربران و بهره‌برداران، نقش مستقیمی در کیفیت و عملکرد محیط تولید دارند.



شکل ۲. مصاحبه با برخی از مهندسان و اپراتورها. تدوین: نویسندگان.

داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها و مشاهدات میدانی با استفاده از کدگذاری باز و کدگذاری محوری تحلیل شدند. در مرحله کدگذاری باز، مفاهیم و مضامین مرتبط با معماری، سازمان فضایی، محیط کار، فرایند تولید، نیازهای کاربران و الزامات عملکردی استخراج شد. سپس در مرحله کدگذاری محوری، کدهای اولیه بر اساس ارتباط مفهومی و محتوایی در قالب مقوله‌های مرتبط سازمان‌دهی شدند. در ادامه، یافته‌های حاصل از کدگذاری با چارچوب نظری اولیه تطبیق داده شد تا ویژگی‌هایی که در چارچوب اولیه وجود نداشتند، شناسایی و تفکیک شوند.

نتایج این تحلیل نشان داد که در کنار ویژگی‌های موجود در چارچوب اولیه، مجموعه‌ای از ویژگی‌های معماری جدید و زمینه‌مند از مطالعات میدانی استخراج می‌شود که متناسب با شرایط، نیازها و الزامات خاص مجموعه‌های صنعتی خودرویی است. این ویژگی‌های جدید، حاصل ترکیب دیدگاه مدیران، تجربه کارکنان و مشاهدات میدانی بوده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول۲. ویژگی‌های معماری نوپدید برای صنایع خودرویی در بستر موج پنجم صنعت (براساس مطالعات میدانی). تدوین: نویسندگان.

شماره	کدهای باز (نمونه)	مقوله محور (ویژگی نهایی)	منشا استخراج	ابعاد ویژگی
۱	کنترل فرآیندها از راه دور، مانیتورینگ لحظه‌ای تولید استفاده از سامانه‌های هوشمند کنترل، کاهش حضور فیزیکی در محیط‌های پرخطر	کارخانه‌های کنترل از راه دور	مصاحبه	مدیریت و کنترل فرآیندهای تولیدی از راه دور و از طریق فناوری‌های دیجیتال
۲	تولید بر اساس سفارش مشتری، تنوع‌پذیری خطوط تولید، انعطاف در برنامه‌ریزی تولید، پاسخگویی سریع به نیاز بازار، تولید مبتنی بر تقاضا	تولید سفارشی و شخصی‌سازی انبوه	بازدید میدانی، مصاحبه	امکان تولید محصولات منحصربه‌فرد برای هر مشتری
۳	کاهش وابستگی به یک کارخانه، استمرار تولید در صورت آسیب یک واحد، توزیع جغرافیایی واحدهای تولیدی، کاهش ریسک توقف کامل تولید	تولید صنعتی توزیع‌شده (چندسایتی)	بازدید میدانی	شبکه‌ای از واحدهای تولیدی کوچک و پراکنده که به جای یک کارخانه بزرگ
٤	قابلیت تغییر چیدمان فضا، فضاهای چندمنظوره، امکان تغییر کاربری فضا، جانمایی منعطف تجهیزات، قابلیت بازپیکربندی فضا، توسعه‌پذیری ساختمان‌های صنعتی	انعطاف‌پذیری فضا با قابلیت پشتیبانی از چند عملکرد	بازدید میدانی، مصاحبه	فضاهای کاری و تولیدی که قابلیت تغییر کاربری و تطبیق با عملکردهای مختلف را دارا باشد
۵	توسعه مشاغل تحلیل داده‌ها، افزایش نقش نیروی انسانی خلاق، اپراتوری سامانه‌های هوشمند، توسعه مهارت‌های دیجیتال	فراهم کردن بستر ایجاد مشاغل نوین برای انسان‌ها	بازدید میدانی	فرصت‌های جدیدی برای مشاغل خلاقانه، مدیریتی و نیازمند مهارت‌های انسانی ایجاد می‌کند
٦	توجه به تفاوت‌های فردی کارکنان، طراحی متناسب با نیاز کاربران، افزایش آسایش روانی کارکنان، محیط کار متناسب با نوع فعالیت، ارتقای رضایت شغلی از طریق محیط کار	طراحی بر پایه گونه شخصیتی	بازدید میدانی، مصاحبه	حس راحتی و انطباق‌پذیری را برای کاربران فراهم می‌کند
۷	بهبود کیفیت ساخت و نگهداری فضاهای تولید، ارتقای نور طبیعی و مصنوعی، تهویه و آسایش حرارتی، کیفیت سطوح و مصالح، و ایجاد محیط کاری مطلوب و متناسب با نیازهای کارکنان	ارتقای کیفیت کالبدی محیط	مصاحبه	کیفیت نامناسب فضاهای کاری، فرسودگی سطوح و تجهیزات کالبدی، نورگیری نامناسب، تهویه ناکافی، آسایش حرارتی پایین، نیاز به بهسازی فضاهای تولید
۸	قابلیت توسعه مرحله‌ای خطوط تولید، امکان بازآرایی چیدمان خطوط، کاهش زمان توقف تولید، قابلیت توسعه آینده کارخانه، بازسازی سریع واحدهای آسیب‌دیده	خطوط تولید مدولار و قابل بازپیکربندی	مصاحبه	طراحی مدولار خطوط تولید به‌منظور تسهیل توسعه، تعمیر، جایگزینی و بازسازی سریع
۹	فضاهای گفت‌وگوی غیررسمی، فضاهای استراحت کارکنان، محیط‌های تبادل دانش، فضاهای همکاری بین‌بخشی، تقویت ارتباط میان کارکنان، محیط‌های خلاقیت و هم‌اندیشی	مکان‌هایی برای تعاملات اجتماعی	بازدید میدانی، مصاحبه	به منظور تسهیل ارتباطات غیررسمی و تقویت روابط اجتماعی بین افراد
۱۰	همکاری هم‌زمان انسان و ربات، مسیرهای ایمن حرکت ربات و انسان، ایمنی تعامل انسان و ربات، زیرساخت استقرار ربات‌های هوشمند، هماهنگی عملکرد ربات و اپراتور	بسترسازی برای ربات‌های همکار	بازدید میدانی	امکان همکاری مؤثر و ایمن میان انسان‌ها و ربات‌های همکار (cobots)

٤.۲. بررسی میزان تطابق ایران‌خودرو خراسان با ویژگی‌های معماری موج پنجم صنعت

در بخش دوم یافته‌های پژوهش، به‌منظور بررسی و سنجش میزان تطابق مجموعه صنعتی ایران‌خودرو خراسان با ویژگی‌های معماری متناسب با موج پنجم صنعت، چارچوب نظری اولیه و ویژگی‌های نوپدید حاصل از مطالعات میدانی مبنای تدوین ابزار سنجش قرار گرفت. جامعه آماری پژوهش شامل ۵۳۵۰ نفر از بهره‌برداران مجموعه ایران‌خودرو خراسان بود که بر اساس فرمول کوکران، حجم نمونه ۳۰۹ نفر تعیین شد. این جامعه شامل سه گروه اصلی کارگران و اپراتورها، تکنسین‌ها و مهندسان بود. در مرحله اجرای نهایی، ۳۰۷ پرسشنامه از بهره‌برداران دریافت و برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفت.

برای طراحی پرسشنامه، ابتدا بر اساس ویژگی‌های موجود در چارچوب نظری و همچنین ویژگی‌های نوپدید شناسایی‌شده در مرحله مطالعات میدانی، گویه‌های متناسب با هر یک از ویژگی‌های معماری تدوین شد. به‌منظور بررسی روایی محتوایی و اصلاح اولیه ابزار، پرسشنامه در مرحله

پیش‌آزمون در اختیار ۷ داور خبره قرار گرفت. بر اساس نظر داوران، ۲۰ گویه مورد اصلاح و بازنگری قرار گرفت و ۵ گویه جدید نیز به ابزار سنجش افزوده شد. پس از اعمال اصلاحات، به‌منظور بررسی میزان وضوح، درک‌پذیری و تناسب گویه‌ها از دیدگاه بهره‌برداران واقعی محیط صنعتی، یک مصاحبه شناختی به‌صورت پایلوت با ۱۵ نفر از بهره‌برداران انجام شد. نتایج این مرحله منجر به اصلاح جزئی ۹ گویه و بازنگری اساسی ۵ گویه شد و نسخه نهایی پرسشنامه برای اجرای اصلی آماده گردید.

در مرحله اجرای اصلی، ۷۰ گویه در اختیار ۳۰۷ نفر از بهره‌برداران مجموعه ایران‌خودرو خراسان قرار گرفت و داده‌های حاصل از پرسشنامه برای ارزیابی ویژگی‌های معماری مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی کیفیت ابزار سنجش نشان داد که پرسشنامه از قدرت تمایز مناسبی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که شاخص قدرت تمیز دی‌کوهن برابر با ۴٫۰۹ به دست آمد که بیانگر قدرت تمیز بالای ابزار در تفکیک پاسخ‌هاست. همچنین، مقدار آلفای کرونباخ برابر با ۰٫۹۲ به دست آمد که نشان‌دهنده پایایی مطلوب و همسانی درونی مناسب گویه‌های پرسشنامه است. در ادامه، به‌منظور بررسی ساختار عاملی ابزار، تحلیل عاملی اکتشافی انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد که عوامل استخراج‌شده در مجموع ۶۸٫۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند که بیانگر توان مناسب ساختار عاملی در توضیح تغییرات موجود در داده‌هاست. همچنین، در تحلیل عاملی تأییدی، گویه‌ها با بار عاملی معنادار در زیر عوامل متناظر قرار گرفتند و ساختار عاملی حاصل از مرحله اکتشافی مورد تأیید قرار گرفت.

در نهایت، داده‌های حاصل از اجرای پرسشنامه برای تعیین میزان تطابق هر یک از ویژگی‌های معماری با وضعیت موجود مجموعه ایران‌خودرو خراسان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این ارزیابی، میزان تحقق و انطباق مجموعه مورد مطالعه با ویژگی‌های معماری متناسب با موج پنجم صنعت را مشخص می‌کند. با توجه به چارچوب نظری پژوهش و با در نظر گرفتن سه بُعد بنیادین صنعت ۵.۰ شامل انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری، ویژگی‌های معماری شناسایی‌شده پس از تکمیل فرایند مطالعات میدانی و کدگذاری، در سه گروه اصلی سازمان‌دهی شدند. این دسته‌بندی با هدف ایجاد ارتباط میان ویژگی‌های معماری و اصول بنیادین صنعت ۵.۰ و همچنین فراهم کردن مبنایی برای تحلیل و ارزیابی وضعیت مجموعه مورد مطالعه انجام گرفت. با توجه به ماهیت میان‌بُعدی برخی ویژگی‌ها، در این دسته‌بندی، بُعد غالب و اصلی اثرگذاری هر ویژگی ملاک قرار گرفت تا از تکرار ویژگی‌ها در چند گروه جلوگیری شود. بر این اساس، چارچوب تکمیل‌شده ویژگی‌های معماری در سه جدول ارائه شده است؛ به‌گونه‌ای که جدول ۳ ویژگی‌های مرتبط با بُعد انسان‌محوری، جدول ۴ ویژگی‌های مرتبط با بُعد پایداری و جدول ۵ ویژگی‌های مرتبط با بُعد تاب‌آوری را نشان می‌دهد.

برای تعیین میزان انطباق ویژگی‌های معماری با وضعیت موجود مجموعه مورد مطالعه، میانگین کلی پاسخ‌ها به‌عنوان شاخص اصلی ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر بالاتر میانگین نشان‌دهنده میزان انطباق بیشتر و مقادیر پایین‌تر بیانگر میزان انطباق کمتر ویژگی موردنظر با وضعیت موجود مجموعه است. بر این اساس، میانگین‌های کمتر از ۳ نشان‌دهنده انطباق پایین، مقادیر ۳ تا کمتر از ۴ بیانگر انطباق متوسط و مقادیر ۴ و بالاتر نشان‌دهنده انطباق زیاد در نظر گرفته شدند.

همچنین، انحراف معیار برای بررسی میزان پراکندگی پاسخ‌ها پیرامون میانگین و در نتیجه، میزان همگرایی دیدگاه پاسخ‌دهندگان مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش، انحراف معیار کمتر از ۰٫۵ به‌عنوان توافق بالا، ۰٫۵ تا کمتر از ۱ به‌عنوان اختلاف نظر متوسط و ۱ و بالاتر به‌عنوان اختلاف نظر زیاد در نظر گرفته شد. بنابراین، انحراف معیار پایین بیانگر همگرایی بیشتر پاسخ‌ها و انحراف معیار بالا نشان‌دهنده تفاوت بیشتر دیدگاه پاسخ‌دهندگان است. در تفسیر نهایی، میزان انطباق هر ویژگی بر اساس میانگین و میزان توافق پاسخ‌دهندگان درباره آن ویژگی با توجه به انحراف معیار بررسی شد.

جدول۳. میزان انطباق ویژگی‌های معماری با بُعد انسان‌محوری در ایران‌خودرو خراسان. تدوین: نویسندگان.

ردیف	ویژگی معماری	میانگین کلی	انحراف معیار	میزان تطابق
۱	فراهم کردن بستر ایجاد مشاغل نوین برای انسان‌ها	۲.۶۷	۰.۳۳	تطابق کم + توافق بالا
۲	خدمات رفاهی پراکنده و در دسترس	۴.۴۶	۰.۵۸	تطابق بالا + اختلاف نظر متوسط

۳	تابلوهای دیجیتال ساده و شفاف	۴.۱۸	۱.۰۲	تطابق بالا + اختلاف نظر زیاد
٤	روشنایی هدفمند و بهره‌گیری از نور طبیعی	۳.۸۹	۰.۶۸	تطابق متوسط + اختلاف نظر متوسط
۵	گروه‌های کاری کوچک و تعلق سازمانی	۲.۳۷	۱.۰۸	تطابق کم + اختلاف نظر زیاد
٦	مکان‌هایی برای تعاملات اجتماعی	۲.۳۴	۰.۷۴	تطابق کم + اختلاف نظر متوسط
۷	پایش آلودگی صوتی و نوسانات حرارتی	۳.۳۳	۰.۴۶	تطابق متوسط + توافق بالا
۸	تهویه هوشمند مبتنی بر پایش شخصی	۲.۳۴	۱.۲۶	تطابق کم + اختلاف نظر زیاد
۹	پاکسازی بو و دود صنعتی	۳.۹۷	۰.۶۳	تطابق متوسط + اختلاف نظر متوسط
۱۰	طراحی بر پایه گونه شخصیتی	۲.۲۶	۰.۸۴	تطابق کم + اختلاف نظر متوسط
۱۱	ارتقای کیفیت کالبدی محیط	۲.۸۶	۰.۳۹	تطابق کم + توافق بالا

جدول ۴. میزان انطباق ویژگی‌های معماری با بُعد پایداری در ایران‌خودرو خراسان. تدوین: نویسندگان.

ردیف	ویژگی معماری	میانگین کلی	انحراف معیار	میزان تطابق
۱	هندسه پایدار و بهینه‌سازی مسیرها	۴.۳۶	۰.۶۱	تطابق بالا + اختلاف نظر متوسط
۲	انرژی و مصالح پایدار	۳.۴۱	۰.۶۷	تطابق متوسط + اختلاف نظر متوسط
۳	بسترسازی برای ربات‌های همکار	۱.۸۹	۰.۴۴	تطابق کم + توافق بالا
٤	واحدهای مستقل و چندمهارتی	۲.۲۸	۰.۷۴	تطابق متوسط + اختلاف نظر متوسط
۵	سلسله‌مراتب دسترسی و ایمنی مسیرها	۴.۱۲	۰.۵۳	تطابق بالا + اختلاف نظر متوسط
٦	کارخانه‌های کنترل از راه دور	۱.۹۳	۰.۸۷	تطابق کم + اختلاف نظر متوسط
۷	خطوط تولید مدولار و قابل بازپیکربندی	۲.۵۴	۱.۰۴	تطابق متوسط + اختلاف نظر زیاد

جدول ۵: میزان انطباق ویژگی‌های معماری با بُعد تاب‌آوری در ایران‌خودرو خراسان. (تدوین: نگارندگان، ۱۴۰۵).

ردیف	ویژگی معماری	میانگین کلی	انحراف معیار	میزان تطابق
۱	جانمایی منعطف تجهیزات	۳.۸۸	۰.۴۱	تطابق متوسط + توافق بالا
۲	تولید سفارشی و شخصی‌سازی انبوه	۲.۲۶	۰.۹۲	تظابق کم + اختلاف نظر متوسط
۳	تولید صنعتی توزیع‌شده (چندسایتی)	۳.۱۶	۱.۱۵	تطابق متوسط + اختلاف نظر بالا
٤	سازماندهی بر پایه چرخه تولید و تعامل واحدها	۴.۲۲	۰.۸۳	تطابق بالا + اختلاف نظر متوسط
۵	سازه‌های توسعه‌پذیر و آینده‌نگر	۳.۶۷	۰.۴۵	تطابق متوسط + توافق بالا

٦	انعطاف‌پذیری و چندعملکردی بودن فضاها	۲.۳۸	۰.۶۲	تطابق کم + اختلاف نظر متوسط
۷	هوشمندسازی فرآیندها و نظارت محیطی	۳.۵۹	۱.۰۸	تطابق متوسط + اختلاف نظر زیاد
۸	تاسیسات نمایان و قابل بهبود	۴.۰۳	۰.۳۹	تظابق زیاد + توافق بالا

نتایج حاصل از ارزیابی ۲۶ ویژگی معماری در سه بُعد انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری نشان داد که میانگین کلی انطباق مجموعه ایران‌خودرو خراسان با ویژگی‌های معماری متناسب با موج پنجم صنعت برابر با ۳،۱۷ از ۵ است که معادل حدود ۶۳،۴ درصد از حداکثر امتیاز قابل کسب است. بر این اساس، وضعیت کلی مجموعه از نظر انطباق با الزامات معماری موج پنجم صنعت در سطح متوسط ارزیابی می‌شود.

در مقایسه سه بُعد اصلی، بُعد تاب‌آوری با میانگین ۳،۴۰ و معادل حدود ۶۸ درصد بالاترین میزان انطباق را نشان داد. پس از آن، بُعد انسان‌محوری با میانگین ۳،۱۵ و حدود ۶۳ درصد قرار گرفت و بُعد پایداری با میانگین ۲،۹۳ و حدود ۵۹ درصد پایین‌ترین میزان انطباق را به خود اختصاص داد. این یافته نشان می‌دهد که اگرچه برخی ظرفیت‌های کالبدی و سازمانی مجموعه با الزامات صنعت ۵.۰ همخوانی مناسبی دارند، اما در زمینه‌هایی همچون فناوری‌های پیشرفته تولید، همکاری انسان و ربات، کنترل از راه دور، انعطاف‌پذیری فضایی، شخصی‌سازی تولید و برخی مؤلفه‌های محیطی، فاصله بیشتری با ویژگی‌های مطلوب صنعت ۵.۰ مشاهده می‌شود.

٤.۳. کاربست ویژگی‌های معماری صنعت نسل پنجم در طراحی مجموعه‌های خودروسازی

پس از شناسایی و اعتبارسنجی ویژگی‌های معماری مرتبط با صنعت نسل پنجم و ارزیابی میزان انطباق و اهمیت آن‌ها در مجموعه صنعتی ایران‌خودرو خراسان، مرحله نهایی پژوهش به تبیین نحوه ترجمه این ویژگی‌ها به راهکارهای طراحی معماری اختصاص یافت. در این مرحله، ویژگی‌های استخراج‌شده صرفاً به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی در نظر گرفته نشده‌اند، بلکه به‌عنوان مبنایی برای بازتعریف سازمان فضایی، ساختار واحدهای تولیدی، کیفیت محیطی و الگوی استقرار فناوری در مجموعه‌های خودروسازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به بیان دیگر، هدف این بخش آن است که نشان دهد ویژگی‌های معماری شناسایی‌شده چگونه می‌توانند از سطح مفهومی و شاخص‌های ارزیابی به سطح تصمیم‌های واقعی طراحی منتقل شوند.

بررسی یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که کاربست ویژگی‌های صنعت نسل پنجم در مجموعه‌های خودروسازی را نمی‌توان به استقرار تجهیزات هوشمند یا رباتیک محدود کرد. این کاربست مستلزم بازتنظیم هم‌زمان رابطه میان انسان، فناوری و فضای کالبدی است. از این منظر، معماری کارخانه باید امکان تغییرپذیری فرآیند تولید، همکاری ایمن انسان و فناوری، کنترل شرایط محیطی، یادگیری و تعامل کارکنان، توسعه‌پذیری و پاسخگویی به تغییرات تولید را فراهم کند. بنابراین، ویژگی‌های شناسایی‌شده در سه مقیاس اصلی مجموعه، واحد تولید و محیط کار و در ارتباط با الگوی تولید و فناوری قابل ترجمه به راهکارهای طراحی هستند.

بر این اساس، پنج دیاگرام پیشنهادی در ادامه ارائه شده است که به‌ترتیب، سازمان‌دهی کلی مجموعه، سازمان‌دهی واحد تولید، سیستم هوشمند محیطی و تحول الگوی تولید را تشریح می‌کنند. این دیاگرام‌ها یک طرح اجرایی ثابت برای تمام کارخانه‌های خودروسازی محسوب نمی‌شوند، بلکه یک چارچوب طراحی قابل انطباق هستند که می‌تواند متناسب با نوع محصول، ظرفیت تولید، فناوری مورد استفاده، شرایط اقلیمی، محدودیت‌های سایت و ساختار سازمانی هر مجموعه تعدیل شود.

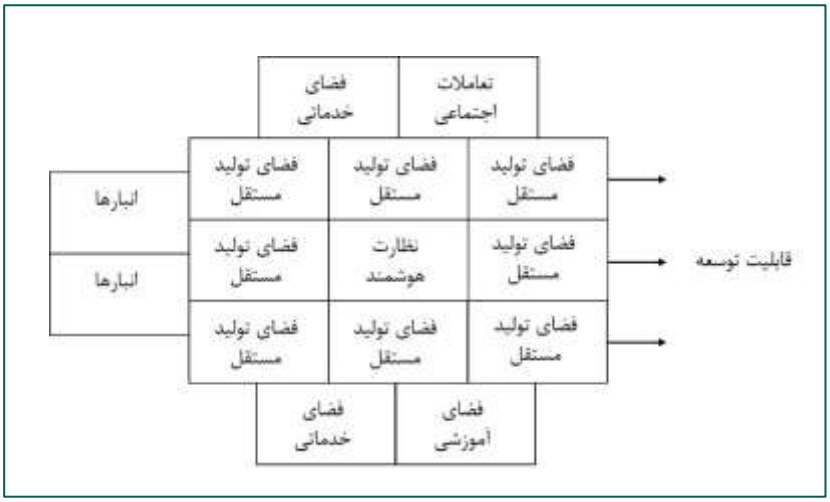
- سازمان‌دهی کلی مجموعه: گذار از کارخانه خطی به ساختار ماژولار و توسعه‌پذیر

در مقیاس مجموعه، نخستین تغییر اساسی، گذار از سازمان‌دهی خطی و نسبتاً ثابت کارخانه به سازمان‌دهی ماژولار، مستقل، قابل توسعه و بازآرایی است. در الگوی سنتی، بسیاری از فضاهای تولیدی به‌صورت زنجیره‌ای و وابسته به یکدیگر سازمان می‌یابند؛ ازاین‌رو تغییر در یک بخش می‌تواند مستلزم مداخله در بخش‌های دیگر و ایجاد اختلال در کل فرآیند باشد. در مقابل، در الگوی پیشنهادی، مجموعه از تعدادی واحد تولیدی مستقل یا نیمه‌مستقل تشکیل می‌شود که هر یک ظرفیت انجام بخشی از فرآیند تولید را دارند و می‌توانند متناسب با نیاز تولید توسعه، جابه‌جا یا بازآرایی شوند. در این ساختار، ارتباط میان واحدهای تولیدی از طریق یک شبکه حرکتی و خدماتی سازمان‌دهی می‌شود و هسته‌های پشتیبان

شامل فضاهای کنترل و پایش، آموزش، خدمات کارکنان، فضاهای تعامل اجتماعی و زیرساخت‌های فنی در موقعیت‌هایی قرار می‌گیرند که دسترسی آن‌ها به چند واحد تولیدی امکان‌پذیر باشد. چنین سازمان‌دهی‌ای، علاوه بر کاهش وابستگی فضایی میان بخش‌های مختلف، امکان توسعه مرحله‌ای کارخانه بدون بازسازی گسترده ساختار موجود را فراهم می‌کند.

یکی از پیامدهای مهم این الگو، تفکیک میان ثبات زیرساخت و تغییرپذیری فضای تولید است. در این حالت، شبکه‌های اصلی زیرساختی، دسترسی‌ها و برخی عناصر سازه‌ای می‌توانند به‌صورت پایدار طراحی شوند، در حالی که چیدمان خطوط، تجهیزات و محدوده‌های تولیدی قابلیت تغییر داشته باشند. این رویکرد، امکان پاسخگویی به تغییرات فناوری، ظرفیت تولید و تنوع محصول را افزایش می‌دهد. همچنین، هسته نظارت و کنترل هوشمند در مرکز یا موقعیتی راهبردی از مجموعه قرار می‌گیرد تا اطلاعات واحدهای تولیدی مستقل را دریافت و پایش کند. با این حال، تمرکز اطلاعاتی به معنای تمرکز کامل عملکرد تولید نیست؛ هر واحد می‌تواند ضمن اتصال به سامانه مرکزی، سطحی از استقلال عملکردی و مدیریتی داشته باشد. بدین ترتیب، ساختار فضایی از یک کارخانه یکپارچه و وابسته به یک مسیر تولید، به شبکه‌ای از واحدهای تولیدی متصل اما نسبتاً مستقل تبدیل می‌شود.

در مجاورت واحدهای تولیدی نیز فضاهای آموزش، استراحت، تعامل اجتماعی و پشتیبانی قرار می‌گیرند. این جانمایی، نقش فضاهای انسانی را از فضاهای حاشیه‌ای و صرفاً خدماتی به بخشی از ساختار اصلی کارخانه ارتقا می‌دهد. نزدیکی آموزش به محیط تولید نیز امکان پیوند میان یادگیری و فعالیت واقعی تولید را تقویت می‌کند و با ویژگی‌هایی همچون نیروی انسانی چندمهارته، یادگیری مستمر و مشارکت کارکنان هم‌راستا است. از این منظر، شکل ۳ صرفاً یک الگوی جانمایی فضایی نیست، بلکه نشان‌دهنده تبدیل مجموعه خودروسازی به یک سیستم فضایی قابل تغییر و توسعه است؛ سیستمی که در آن استقلال واحدهای تولیدی، انعطاف‌پذیری، توسعه‌پذیری، هوشمندسازی، پشتیبانی انسانی و امکان بازآرایی در یک ساختار واحد با یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند.



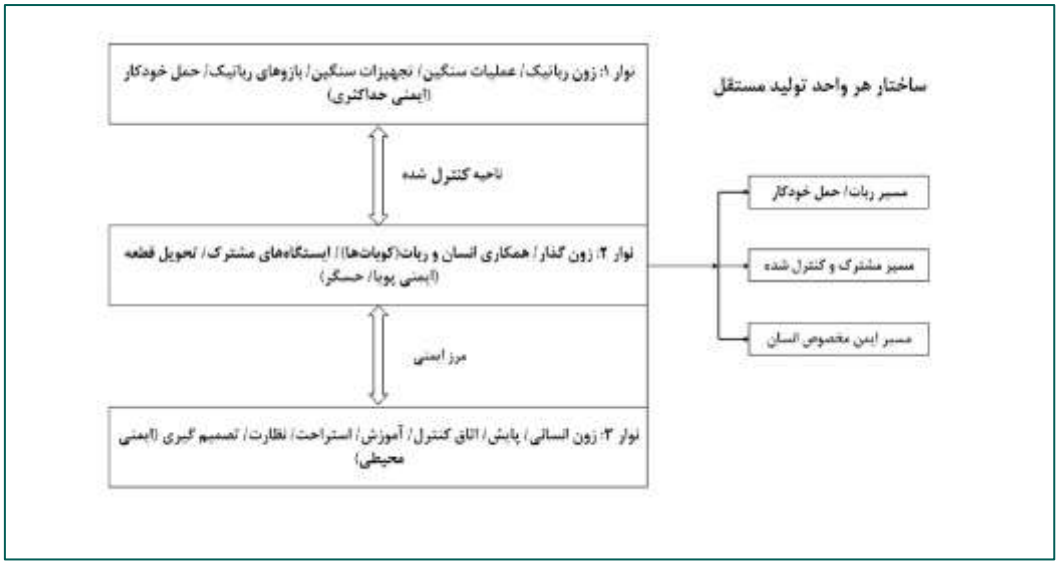
شکل۳. سازمان‌دهی کلی فضای کارخانه خودروسازی نسل پنجم. تدوین: نویسندگان.

- سازمان‌دهی واحد تولید: همنشینی ایمن انسان، ربات و فناوری

در مقیاس واحد تولید، کاربست ویژگی‌های معماری صنعت نسل پنجم مستلزم بازتعریف رابطه فضایی میان نیروی انسانی و فناوری‌های رباتیک است. در الگوی پیشنهادی، واحد تولید مستقل به سه حوزه اصلی تقسیم می‌شود: زون روباتیک، زون همکاری انسان—ربات و زون انسانی. زون روباتیک برای فعالیت‌های سنگین، تکراری یا دارای ریسک بالاتر در نظر گرفته می‌شود و طراحی آن بر جداسازی ایمن، کنترل دسترسی و کاهش مواجهه مستقیم کارکنان با خطرات تأکید دارد. در مقابل، زون همکاری انسان—ربات برای فعالیت‌هایی طراحی می‌شود که در آن حضور هم‌زمان انسان و فناوری بخشی از فرآیند تولید است. در این بخش، طراحی فضایی باید امکان دید، دسترسی، کنترل و ارتباط میان کارکنان و تجهیزات را بدون ایجاد تداخل حرکتی فراهم کند. زون انسانی نیز شامل فضاهای پایش، کنترل، آموزش، استراحت کوتاه‌مدت و تعامل کارکنان است. اهمیت این زون در آن است که انسان صرفاً به‌عنوان اپراتور تجهیزات تعریف نمی‌شود، بلکه به‌عنوان عنصر فعال، تصمیم‌گیرنده، یادگیرنده

و چندمهارته در فرآیند تولید حضور دارد. بنابراین، فضاهای انسانی باید از نظر دسترسی، دید، آسایش و ارتباط با فرآیند تولید به‌گونه‌ای سازمان یابند که کارکنان بتوانند ضمن حفظ ایمنی، بر فرآیند تولید نظارت و در آن مشارکت کنند.

علاوه بر تقسیم‌بندی عملکردی، سه مسیر حرکتی نیز برای حرکت تجهیزات و ربات‌ها، حرکت مشترک کنترل‌شده و حرکت ایمن انسانی تعریف می‌شود. این تفکیک مسیرها می‌تواند از تداخل حرکتی و افزایش ریسک جلوگیری کند و در عین حال امکان ارتباط کنترل‌شده میان حوزه‌های مختلف را فراهم سازد. مرزهای میان زون‌ها نیز به‌جای آنکه صرفاً دیوارهای ثابت باشند، می‌توانند با استفاده از ترکیبی از عناصر کالبدی، علائم، کنترل دسترسی، تجهیزات ایمنی و فناوری‌های پایش تعریف شوند. از سوی دیگر، واحد تولید باید قابلیت تغییر چیدمان داشته باشد. بنابراین، محل استقرار تجهیزات نباید به‌گونه‌ای طراحی شود که هر تغییر فناوری مستلزم تغییرات اساسی در ساختمان باشد. استفاده از دهانه‌های مناسب، شبکه‌های زیرساختی قابل توسعه، مسیرهای خدماتی قابل دسترس و امکان جابه‌جایی تجهیزات، ظرفیت بازآرایی واحد را افزایش می‌دهد. در نتیجه، معماری واحد تولید به‌جای آنکه صرفاً ظرفی برای ماشین‌آلات باشد، به یک زیرساخت انعطاف‌پذیر برای تعامل انسان و فناوری تبدیل می‌شود. این سازمان‌دهی در شکل ۴ ارائه شده و نشان می‌دهد که چگونه ویژگی‌هایی نظیر همکاری انسان—ربات، ایمنی، چندمهارته بودن نیروی انسانی، انعطاف‌پذیری، استقلال واحدهای تولیدی و انسان‌محوری می‌توانند به تصمیم‌های مشخص در زمینه زون‌بندی، مسیرهای حرکتی و سازمان فضایی تبدیل شوند.



شکل ۴. سازمان‌دهی هر واحد تولید مستقل. تدوین: نویسندگان.

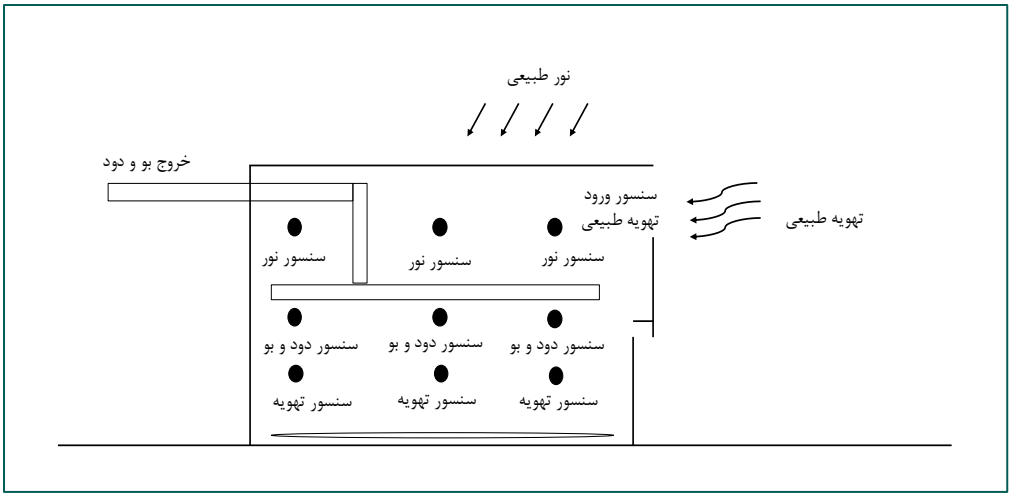
- محیط هوشمند و قابل تنظیم: ترجمه انسان‌محوری به کیفیت محیطی

یکی دیگر از حوزه‌های اصلی کاربست ویژگی‌های معماری صنعت نسل پنجم، طراحی شرایط محیطی متناسب با نیازهای کارکنان و نوع فعالیت تولیدی است. در کارخانه‌های بزرگ، یکسان‌سازی شرایط محیطی برای تمام بخش‌ها لزوماً با تفاوت‌های موجود در نوع فعالیت، تراکم نیروی انسانی، تجهیزات، آلاینده‌ها و نیازهای حرارتی و روشنایی سازگار نیست. ازاین‌رو، در الگوی پیشنهادی، هر واحد تولیدی به‌عنوان یک محیط قابل تنظیم در نظر گرفته می‌شود.

در این الگو، حسگرهای محیطی اطلاعات مربوط به نور، دما، رطوبت، کیفیت هوا، دود و بو را جمع‌آوری می‌کنند و سامانه کنترل محیطی بر اساس اطلاعات دریافت‌شده، شرایط هر واحد را به‌صورت مستقل تنظیم می‌کند. برای مثال، در بخش‌هایی که فعالیت دقیق یا کنترل کیفی انجام می‌شود، کیفیت و شدت روشنایی می‌تواند متناسب با نیاز فعالیت تنظیم شود؛ در بخش‌هایی که تولید آلاینده بیشتری دارد، تهویه موضعی و کنترل کیفیت هوا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ و در فضاهایی با تراکم بالاتر کارکنان، کنترل دما و تهویه می‌تواند متناسب با شرایط واقعی محیط انجام شود.

در این میان، نور طبیعی نیز می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های طراحی محیطی مورد توجه قرار گیرد. استفاده از نور روز، در صورت سازگاری با نیازهای فرآیند تولید، می‌تواند در کنار سامانه‌های روشنایی مصنوعی هوشمند قرار گیرد و میزان روشنایی را متناسب با شرایط واقعی محیط تنظیم کند. همچنین، تهویه طبیعی و مکانیکی می‌توانند به‌صورت مکمل مورد استفاده قرار گیرند، مشروط بر آنکه الزامات فرآیند صنعتی و ایمنی رعایت شود. ویژگی مهم این رویکرد، کنترل محیط در مقیاس واحد یا زون تولید است، نه الزاماً در مقیاس کل کارخانه. در نتیجه، هر بخش می‌تواند شرایط محیطی متناسب با نوع فعالیت خود داشته باشد. این امر امکان پاسخگویی به تفاوت‌های محیطی میان واحدهای مختلف و کاهش وابستگی به یک الگوی ثابت را فراهم می‌کند.

از منظر معماری، بنابراین، هوشمندسازی صرفاً به نصب تجهیزات دیجیتال محدود نیست؛ بلکه نیازمند طراحی هم‌زمان فضا، پوسته، زیرساخت، سیستم‌های تأسیساتی و سامانه‌های کنترل است. جایگاه حسگرها، دسترسی برای تعمیر و نگهداری، مسیرهای انتقال اطلاعات و ارتباط سامانه‌های کنترل با تجهیزات محیطی باید از مراحل اولیه طراحی مورد توجه قرار گیرد. شکل ۵ این رابطه میان فضای تولید و سیستم‌های هوشمند محیطی را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که چگونه ویژگی‌هایی همچون محیط کار قابل تنظیم، تهویه و کنترل هوشمند، کیفیت محیطی و انسان‌محوری می‌توانند به یک سیستم کالبدی—فنی یکپارچه تبدیل شوند.



شکل ۵. سیستم‌های هوشمند کارخانه موج پنجم. تدوین: نویسندگان.

- الگوی تولید و پیامدهای کالبدی آن: از تولید انبوه به تولید منعطف و سفارشی

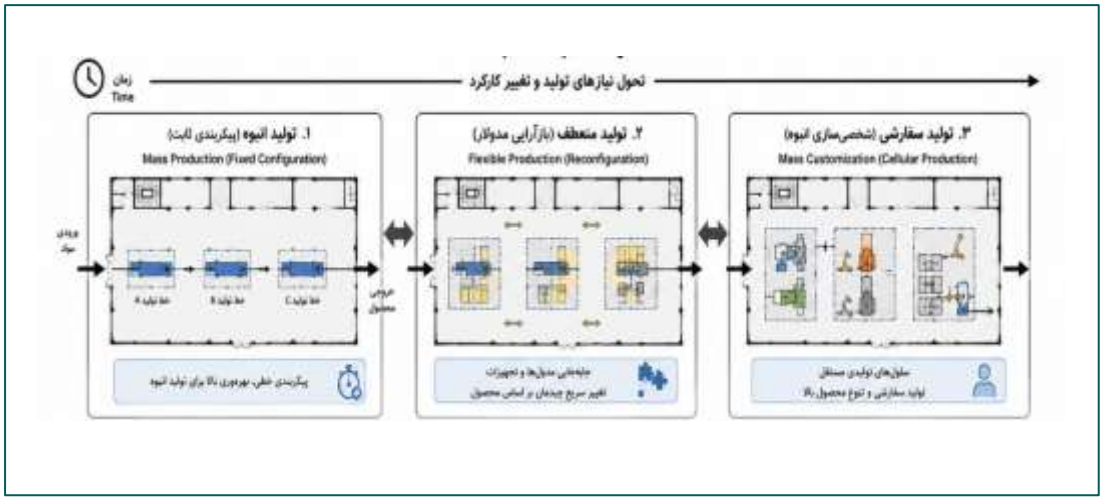
کاربست ویژگی‌های صنعت نسل پنجم تنها به سازمان فضایی و شرایط محیطی محدود نمی‌شود، بلکه تغییر در الگوی تولید نیز پیامدهای مستقیمی برای معماری کارخانه دارد. در الگوی تولید انبوه، فضا غالباً بر اساس یک توالی نسبتاً ثابت و طولانی از مراحل تولید سازمان می‌یابد. در چنین ساختاری، تغییر محصول یا فرآیند می‌تواند مستلزم تغییرات گسترده در چیدمان و زیرساخت باشد.

در مقابل، تولید منعطف مستلزم آن است که معماری بتواند تغییرات مکرر در فرآیند، تجهیزات و ظرفیت تولید را تحمل کند. از این منظر، واحدهای تولیدی مستقل، خطوط ماژولار، فضاهای قابل توسعه و زیرساخت‌های قابل تغییر، بخشی از پاسخ معماری به تحول الگوی تولید محسوب می‌شوند. تجهیزات و ماژول‌های تولیدی می‌توانند بر اساس نیازهای جدید جابه‌جا شوند و محدوده‌های تولیدی نیز قابلیت افزایش یا کاهش ظرفیت داشته باشند.

این انعطاف‌پذیری همچنین می‌تواند زمینه تولید متنوع‌تر و سفارشی‌تر را فراهم کند. هنگامی که فرآیند تولید به واحدهای قابل تنظیم و ماژول‌های مستقل تقسیم شود، امکان اختصاص ظرفیت‌های متفاوت به محصولات یا سفارش‌های مختلف افزایش می‌یابد. در این حالت، کارخانه به‌جای آنکه تنها برای یک توالی ثابت تولید طراحی شود، ظرفیت پاسخگویی به سناریوهای متفاوت تولید را پیدا می‌کند. از منظر معماری، چنین تحولی به معنای حرکت از «طراحی برای یک فرآیند مشخص» به سمت طراحی برای تغییر فرآیند است. بنابراین، قابلیت توسعه سازه‌ای، دسترسی

مناسب برای جابه‌جایی تجهیزات، انعطاف در شبکه تأسیسات، امکان تغییر مسیرهای حرکتی، پیش‌بینی فضاهای توسعه و قابلیت تقسیم یا ادغام واحدهای تولیدی، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند.

این رویکرد با مفهوم تاب‌آوری نیز ارتباط دارد؛ زیرا مجموعه‌ای که بتواند بدون بازسازی اساسی، خود را با تغییرات فناوری، محصول یا ظرفیت تولید تطبیق دهد، از نظر فضایی آمادگی بیشتری برای مواجهه با شرایط متغیر خواهد داشت. همچنین، استقلال نسبی واحدهای تولیدی می‌تواند امکان ادامه فعالیت سایر بخش‌ها را در صورت تغییر یا توقف موقت یک واحد افزایش دهد. شکل ۶ این تحول را از الگوی تولید انبوه و خطی به سمت تولید منعطف، ماژولار و سفارشی نشان می‌دهد. در اینجا، تغییر الگوی تولید به‌عنوان یکی از عوامل اصلی بازتعریف معماری کارخانه در نظر گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که انعطاف‌پذیری فضایی و قابلیت بازآرایی، بخشی از ساختار پایه کارخانه محسوب می‌شوند، نه راهکاری که پس از ساخت به مجموعه افزوده شود.



شکل ۶. تحول الگوی تولید کارخانه خودروسازی. تدوین: نویسندگان.

- مقیاس‌های مداخله معماری و تحقق ویژگی‌های صنعت پنجم

تحقق الزامات صنعت پنجم در مجموعه‌های صنعتی خودروسازی، صرفاً به استقرار فناوری‌های نوین یا تغییر در شیوه تولید محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم بازتعریف محیط کالبدی در مقیاس‌های مختلف است. ویژگی‌های معماری مرتبط با انسان‌محوری، انعطاف‌پذیری، تعامل انسان و فناوری، پایداری و تاب‌آوری، بسته به مقیاس مداخله، صورت‌های متفاوتی پیدا می‌کنند. ازاین‌رو، برای تبدیل ویژگی‌های شناسایی‌شده به راهکارهای قابل استفاده در طراحی، لازم است ارتباط میان این ویژگی‌ها و اجزای مختلف مجموعه صنعتی از مقیاس کلان سایت تا محیط کاری فردی تبیین شود.

بر این اساس، مداخلات معماری را می‌توان در پنج مقیاس اصلی شامل سایت و محیط صنعتی، ساختار و فضای سازمانی، سالن تولید، خط تولید و تجهیزات، و محیط کاری فردی بررسی کرد. در مقیاس سایت، موضوعاتی همچون سلسله‌مراتب دسترسی، توزیع خدمات، زیرساخت‌های پایدار، کنترل آلاینده‌ها و امکان پایش از راه دور اهمیت می‌یابند؛ در مقیاس ساختار و سازمان فضایی، انعطاف‌پذیری، توسعه‌پذیری، واحدهای مستقل و چندمهارتی و فضاهای تعامل اجتماعی مورد توجه قرار می‌گیرند. در مقیاس سالن تولید نیز کیفیت محیطی، نور، تهویه، کنترل شرایط حرارتی و صوتی و دسترس‌پذیری تأسیسات، و در مقیاس خط تولید و محیط کاری، قابلیت بازپیکربندی، همکاری انسان و ربات، جانمایی منعطف تجهیزات و شخصی‌سازی محیط کار اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند.

بر همین مبنا، ویژگی‌های استخراج‌شده از پژوهش در قالب یک چارچوب کاربردی بازتنظیم شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که ویژگی‌هایی با ماهیت مدیریتی، فناورانه یا پیامدی، در صورت امکان به مداخلات فضایی، کالبدی و زیرساختی متناظر تبدیل شوند. حاصل این تطبیق در شکل ۷ ارائه شده

است. این جدول را می‌توان به‌عنوان یک چک‌لیست طراحی و ارزیابی اولیه در نظر گرفت که امکان بررسی میزان تحقق الزامات معماری صنعت پنجم را در مقیاس‌های مختلف یک مجموعه صنعتی خودروسازی فراهم می‌کند.



شکل ۷. ویژگی‌ها و مداخلات معماری صنعت پنجم در مقیاس‌های مختلف مجموعه صنعتی. تدوین: نویسندگان.

نتیجه گیری

بر اساس یافته‌های پژوهش، مجموعه‌ای از ۲۶ ویژگی معماری مرتبط با الزامات صنعت نسل پنجم شناسایی و اعتبارسنجی شد. این ویژگی‌ها ابتدا از طریق مطالعات نظری و تحلیل‌های انجام‌شده در بطن پژوهش استخراج و سپس با استفاده از فرآیند دلفی و نظر خبرگان تأیید شدند. در ادامه، به‌منظور بررسی قابلیت انطباق و کاربردپذیری آن‌ها در محیط واقعی تولید، مطالعات میدانی شامل بازدید از مجموعه صنعتی، مشاهده و مصاحبه با بهره‌برداران انجام گرفت و ویژگی‌های شناسایی‌شده در قالب پرسشنامه در میان بهره‌برداران مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برآیند این مراحل نشان می‌دهد که این ۲۶ ویژگی را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از راهبردهای معماری برای بازآرایی و ارتقای مجموعه‌های صنعتی خودروسازی در نظر گرفت. کاربست این ویژگی‌ها در طراحی، با ایجاد انعطاف‌پذیری فضایی، تولید ماژولار و سفارشی، همکاری انسان و ربات، هوشمندسازی محیط، ارتقای ایمنی، توجه به نیازهای انسانی و قابلیت توسعه و تغییرپذیری فضاها، زمینه گذار از الگوی سنتی کارخانه به الگوی فضایی متناسب با الزامات صنعت نسل پنجم را فراهم می‌کند.

بر این اساس، به‌کارگیری یکپارچه ۲۶ ویژگی معماری شناسایی‌شده در طراحی و بازطراحی مجموعه‌های صنعتی خودروسازی، می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب معماری برای ارتقای این مجموعه‌ها به الگوی کارخانه‌های منطبق با صنعت نسل پنجم مطرح شود. دیاگرام‌های ارائه‌شده در این پژوهش نیز تلاشی برای ترجمه این ویژگی‌ها از سطح مفهومی به سازمان‌دهی فضایی، ساختار واحدهای تولید، سیستم‌های هوشمند محیطی و الگوی تحول تولید هستند.

دستاورد پژوهش

دستاورد اصلی این پژوهش، شناسایی و اعتبارسنجی ۲۶ ویژگی معماری متناسب با الزامات صنعت نسل پنجم در مجموعه‌های صنعتی خودروسازی است. این ویژگی‌ها با ترکیب مطالعات نظری، اجماع خبرگان و مطالعات میدانی استخراج و در محیط واقعی تولید ارزیابی شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تحقق این ویژگی‌ها می‌تواند با تقویت انسان‌محوری، انعطاف‌پذیری فضایی، تولید ماژولار، همکاری انسان و ربات، هوشمندسازی، ایمنی، پایداری و قابلیت توسعه و تغییرپذیری فضاها، زمینه گذار از الگوی سنتی کارخانه به محیط تولید منطبق با صنعت نسل پنجم را فراهم کند. نوآوری پژوهش، ترجمه اصول صنعت نسل پنجم به مجموعه‌ای از ویژگی‌های مشخص و قابل ارزیابی در مقیاس معماری است. این چارچوب می‌تواند توسط معماران و مدیران صنعتی برای ارزیابی، طراحی و بازطراحی مجموعه‌های خودروسازی مورد استفاده قرار گیرد و مبنایی برای توسعه شاخص‌های ارزیابی و مطالعات آینده در سایر صنایع تولیدی باشد.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: «این مقاله برگرفته از رساله دکتری آقای فرجاد بازقندی نویسنده مسئول با عنوان شناسایی ویژگی‌های معماری بهره‌ورانه در بخش تولید مجموعه‌های صنعتی سنگین ایران در بستر موج پنجم صنعت (مطالعه موردی: ایران‌خودرو خراسان) است که با راهنمایی آقای دکتر مجید صالحی نیا و آقای دکتر عباس جهانبخش و مشاوره آقای دکتر حسین سلماوانیان در دانشگاه هنر اصفهان دفاع گردیده است»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: «نویسندگان اعلام می‌دارند در این پژوهش از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.»

پی‌نوشت

1. Schwab, K.

منابع

بازقندی، فرجاد، صالحی‌نیا، مجید، جهانبخش، عباس و سماواتیان، حسین. (۱۴۰۵). شناسایی ویژگی‌های معماری بهره‌ورانه مجموعه‌های صنعتی سنگین ایران در بستر موج پنجم صنعت بر پایه اجماع خبرگان، *باغ نظر، سال بیست‌وسوم*، شماره ۱۵۷، ۴۷–۵۸.

بیات، کیومرث. (۱۳۸۴). معماری صنعتی، معماری در خدمت صنعت، *ماهنامه ساختمان و کامپیوتر*، تهران.

تافلر،آلوین. (۱۳۷۳). *موج سوم*، ترجمه :خوارزمی، شهیندخت، چاپ نهم ،تهران: نشر سیمرغ.

دهخدا، علی‌اکبر. (۱۳۷۷). *لغت‌نامه دهخدا*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

شواب، کلاوس. (۱۳۹۹). *به سوی صنعت*، ترجمه: کیانی بختیاری، ابوالفضل، تهران: انتشارات سازمان مدیریت صنعتی.

طباطبائیان، سید حبیب الله. (۱۳۸۸). *چارچوب و مفاهیم تکنولوژی‌های برتر*. تهران: وزارت صنایع و معادن، مرکز صنایع نوین.

عمید، حسن. (۱۳۷۷). *فرهنگ فارسی عمید*. تهران: انتشارات امیرکبیر.

کیانی بختیاری، ابوالفضل، موسوی موحدی،علی اکبر. (۱۴۰۰). انقلاب صنعتی چهارم و تغییرات بنیادین پیشرو، *نشریه نشاء علم، سال یازدهم*، شماره دوم، خرداد ماه.

گودینی، جواد. (۱۳۹۵). *الگوی فرآیند طراحی معماری در مجموعه‌های صنعتی*، رساله دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

گودینی، جواد، وفامهر، محسن، گرجی مهلبانی، یوسف و براتی، ناصر. (۱۳۹۵). ارزیابی دانش معماری ایران در زمینه مجموعه‌های صنعتی؛ به منظور کشف چالش‌ها و ارائه راهبردهای توسعه، *باغ نظر*، تهران: پژوهشکده هنرمعماری و شهرسازی نظر، شماره ۴۱، مهر و آبان.

گودینی،جواد، وفامهر، محسن و گرجی مهلبانی، یوسف. (۱۴۰۰) . فرآیند طراحی معماری در مجموعه‌های صنعتی،چاپ اول ،تهران : انتشارات طحان گستر.

نیکزادفر، مونا. (۱۴۰۳). *اصول طراحی معماری کارخانه‌های صنعتی*. تهران: انتشارات اول و آخر.

یوسف زاده، زینب و قدسی فر، سید هادی. (۱۳۹۶). ارزیابی نقش فضای معماری در ارتقاء بهره‌وری نیروی انسانی، *ششمین کنفرانس بین المللی اقتصاد، مدیریت و علوم مهندسی*.

Barata, João., & Kayser, Ina. (2023). Industry 5.0 – Past, present, and near future, *Procedia Computer Science*, *219*, 778–788. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.351

Bocken, Nancy M. P., Short, Samuel W. (2021). Unsustainable Business Models – Recognising and resolving institutionalised social and environmental harm, *Journal of Cleaner Production*, *312*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127828

Breque, Maija., De Nul, Lars., Petridis, Athanasios. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. European Commission.

Campagna, Giulio., & Rehm, Matthias. (2023). A systematic review of trust assessments in human-robot interaction, *ACM Transactions on Human-Robot Interaction, 37*(4), Article 111.

Chen, Xinyu., Li, Ke., Kammering, Raimund., Leemans, Wim., & Steinicke, Frank. (2026). *Human-robot collaboration design space for critical large-scale infrastructures*. CHI'26: XR4CE Workshop, Barcelona, Spain.

Demir, Kadir Alpaslan., Cicibaş, Halil. (2019). The Next Industrial Revolution: Industry 5.0 and Discussions on Industry 4.0, *4th International Management Information Systems Conference "Industry 4.0"*, İstanbul University, İstanbul, Turkey.

Demir, Kadir Alpaslan., Döven, Gözde., Sezen, Bülent. (2019). Industry 5.0 and Human-Robot Co-working, 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship, *Procedia Computer Science, Elsevier, 158*(2019), 688–695. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104

Encyclopaedia Britannica. *Industry*. Encyclopaedia Britannica.

European Commission. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.* Publications Office of the European Union.

Ghobakhloo, Morteza., Iranmanesh, Mohammad., Mubarak, Muhammad Faraz., Mubarik, Mobashar., Rejeb, Abderahman., & Nilashi, Mehrbakhsh. (2022). Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development: Astrategy roadmap for delivering sustainability values, *Sustainable Production and Consumption*, 33 (2022), 716-737. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.003

Goodini, J., Vafamehr, M., & Gorji, Y. *The Architectural Design Process in Industrial Complexes. 1st ed*. Tehran: Tahan Gostar Publications; 2021. [Persian].

Gugercin, Seda., Gugercin, Utku. (2021). HOW EMPLOYEES SURVIVE IN THE INDUSTRY 5.0 ERA: IN-DEMAND SKILLS OF THE NEAR FUTURE, *International Journal of Disciplines Economics & Administrative Sciences Studies. July, 2021 Vol:7,* Issue:31.

Holness, Anthony., & Giddings, Bob. (1996). Developing a Methodology for Investigating the Design of Award Winning Industrial Architecture, Nordisk Arkitekturforskning.

Kovári, A. (2024). Industry 5.0: Generalized definition, key applications, opportunities and threats, *Acta Polytechnica Hungarica*, *21*(3), 119–134. https://doi.org/10.12700/APH.21.3.2024.3.1

Lachvajderova, Laura., Kadarova, Jaroslava., Sanchis, Ernesto Julia., & Rybarova, Denisa. (2023). Industry 5.0 - A Sustainable Human-Centric Solution, April 2023, *Conference: Novus Scientia 2023*, At: Košice, Slovakia.

Longo, Francesco., Padovano, Antonio., & Umbrello, Steven. (2020). Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0: A Human-Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future, Applied *Sciences*, *10*(12). https://doi.org/10.3390/app10124182

Mattila, Vilma., Gauri, Pratik., Dwivedi, Prateek., & Dadhich, Dhanraj. (2022). The Fifth Industrial Revolution: Enlightenment of 5ire towards Industry 5.0, *International Journal of Creative Interfaces and Computer Graphics (IJCICG)*, 173-180.

Metcalf, Gary S. (2024). An introduction to industry 5.0: History, foundations, and futures. In S. Nousala, R. J. Howlett, & L. C. Jain (Eds.), Industry 4.0 to industry 5.0*, (Translational Systems Sciences, Vol. 41), Springer.* https://doi.org/10.1007/978-981-99-9730-5_1

Nahavandi, Saeid. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution, *Sustainability 2019, 11*(16), https://doi.org/10.3390/su11164371

Odeleye, Olawale A. (1967). *DESIGN CONSIDERATIONS IN INDUSTRIAL ARCHITECTURE*, School of Architecture, McGill· University, Montreal, Canada.

Ostergaard, E.H. (2018). *Welcome to Industry 5.0*, https://www.isa.org/intech/20180403

Oyekunle, David., Matthew, Ugochukwu Okwudili., Bakare, Kafayat Motomori., Fatai, Lateef Olawale., & Asuni, Olasubomi. (2024). Industry 5.0: A paradigm shift towards sustainability, adaptability and human-centeredness. In *Proceedings of the 12th IPMA Research Conference: Project Management in the Age of Artificial Intelligence* (pp. 119–134). IPMA. https://doi.org/10.56889/mxee1654

Rijwani, Tarun., Kumari, Soni., Abhishek, Kumar., Iyer, Ganesh., Vara, Harsh., Dubey, Shreya., Revathi, V., & Gupta, Manish. (2024). Industry 5.0: a review of emerging trends and transformative technologies in the next industrial revolution, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM),* Issue 2.

Souza, Raphael Odebrecht., Ferenhof, Helio Aisenberg., & Forcellini, Fernando Antônio. (2022). Industry 4.0 and industry 5.0 from the lean perspective, *International Journal of Management, Knowledge and Learning, 11*(2022), 145-155. https://www.doi.org/10.53615/2232-5697.11.145-155

Tomidei, Laura., Guertler, Matthias., Sick, Nathalie., Paul, Gavin., & Carmichael, Marc. (2024). Design principles for safe human robot collaboration, *Interaction Design and Architecture(s) Journal - IxD&A*, 61, 66–97. DOI: https://doi.org/10.55612/s-5002-061-002

Tóth, Attila., Nagy, László., Kennedy, Roderick., Bohuš, Belej., Abonyi, János., & Ruppert, Tamás. (2023). The human-centric industry 5.0 collaboration architecture. *MethodsX*, *11*, 102260. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102260

Xiao, Lizhen., Xu, Liyun., & Shang, Gang. (2025). Workstation equipment layout optimization for enhanced human-robot collaboration in electric vehicle battery disassembly, *Procedia CIRP, 134*, 693–698.

Xu, Xun., Lu, Yuqian., Vogel-Heuser, Birgit., & Wang, Lihui. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception, *Journal of Manufacturing Systems 61* (2021), 530-535. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Zhou, Xinbang., Wang, Fan., & Fan, Liuqun. (2025), "Parametric Layout Design System for Human-Robot Collaboration Assembly Cell Based on OpenCASCADE," *Procedia CIRP, Vol. 134*, pp. 951–956, https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.239